

Karakterisasi pelet sinter simulasi DUPIC hasil proses oksidasi-reduksi siklus ke-1

Erilia Yusnitha, Tri Yulianto, Sigit, Jan Setiawan

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN,
Kawasan Puspipstek-Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia
e-mail : erilia@batan.go.id
(Naskah diterima 23-06-2015 disetujui 07-07-2015)

Abstract

Characterization of UO_2 sintered DUPIC simulation fuel pellet of oxidation-reduction process cycle-1. Oxidation process at a temperature of 500 °C had been done to UO_2 sintered pellets as DUPIC fuel simulation with burn-up 40 MWd/kgU and 60 MWd/kgU. From oxidation process it was obtained U_3O_8 powder that then reduced using hydrogen gas at a temperature of 800 °C to reobtain UO_2 powder. Characterization of UO_2 powder from the cycle-1 of oxidation-reduction process was performed to determine density, surface area, and O/U ratio. To be used as DUPIC fuel, the UO_2 powders obtained were compacted to produce green pellets and then were sintered at a temperature of 1700 °C to obtain sintered pellets of oxidation-reduction process product in the cycle-1. Characterization of sintered pellets was carried out in order to determine the density of sintered pellets, hardness, and microstructure. The experiments showed that bulk density and ratio O/U DUPIC fuel simulation with burn-up 40 MWd/kgU and 60 MWd/kgU were relatively similar, but tap density and surface area were different. Characterization of sintered pellets showed density of sintered pellets DUPIC fuel with burn-up 60 MWd/kgU was better than 40 MWd/kgU. However, the microstructure analysis of sintered pellets with burn-up 60 MWd/kgU was better than burn-up 40 MWd/kgU.

Keywords : DUPIC simulated fuel, oxidation-reduction process, density, surface area, O/U ratio.

Abstrak

Karakterisasi pelet sinter simulasi DUPIC hasil proses oksidasi-reduksi siklus ke-1. Telah dilakukan karakterisasi terhadap pelet sinter UO_2 bahan bakar simulasi DUPIC hasil proses oksidasi-reduksi siklus ke-1. Proses oksidasi dilakukan pada suhu $500\text{ }^\circ\text{C}$ terhadap pelet sinter UO_2 yang merupakan bahan bakar simulasi DUPIC dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU. Dari proses oksidasi tersebut diperoleh serbuk U_3O_8 yang kemudian direduksi dengan menggunakan gas hidrogen pada suhu $800\text{ }^\circ\text{C}$ hingga diperoleh serbuk UO_2 DUPIC. Karakterisasi serbuk UO_2 hasil oksidasi-reduksi siklus ke-1 tersebut meliputi penentuan densitas, *surface area* dan rasio O/U. Untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar DUPIC, serbuk UO_2 yang diperoleh dikompakkan menjadi pelet mentah kemudian disinter pada suhu $1700\text{ }^\circ\text{C}$ hingga diperoleh pelet sinter UO_2 DUPIC hasil proses oksidasi-reduksi siklus ke-1. Karakterisasi pelet sinter tersebut dilakukan untuk memperoleh data uji densitas, kekerasan dan mikrostruktur. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa serbuk UO_2 bahan bakar DUPIC simulasi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU memberikan nilai *bulk density* dan rasio O/U yang relatif sama, sedangkan *tap density* dan *surface area*, memberikan nilai yang berbeda. Hasil karakterisasi pelet sinter diperoleh bahwa densitas pelet sinter UO_2 bahan bakar DUPIC simulasi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU lebih baik dari *burn-up* 40 MWd/kgU, sedangkan mikrostruktur pelet sinter dengan *burn up* 60 MWd/kgU lebih baik dibandingkan dengan *burn-up* 40 MWd/kgU.

Kata kunci : Bahan bakar simulasi DUPIC, proses oksidasi-reduksi, densitas, luas permukaan, rasio O/U.

1. Pendahuluan

DUPIC (Direct Use of PWR spent fuel in CANDU reactor) telah dikenal secara internasional sejak dikembangkan oleh negara Korea bekerja sama dengan Kanada, dan merupakan salah satu teknologi daur ulang bahan bakar nuklir alternatif. Teknologi tersebut termasuk unik dan penuh inovasi dibandingkan dengan yang lain seperti olah ulang (*reprocessing*) dan daur ulang bahan bakar MOX^[1]. Dalam konsep DUPIC tersebut terjadi sinergi antara reaktor PWR dan PHWR/CANDU yaitu penggunaan bahan bakar bekas PWR yang dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar reaktor PHWR/CANDU tanpa menggunakan metode proses basah. Jadi dalam pengolahan bahan bakar bekas PWR untuk reaktor CANDU

hanya menggunakan proses kering saja^[2]. Hasil fisi yang terdapat dalam bahan bakar bekas PWR cukup untuk dibakar lagi dalam reaktor CANDU. Reaktor CANDU mempunyai kemampuan untuk memperoleh energi maksimum dari hasil fisi termal pada pembakaran uranium alam. Absorpsi neutron yang rendah oleh pendingin dan moderator air berat sejalan dengan penggunaan uranium alam dan uranium pengayaan rendah. Faktor yang mendasari teknologi bahan bakar DUPIC adalah fleksibilitas dan sinergisme antara PWR dan PHWR/CANDU yang menggunakan prinsip penggunaan langsung bahan bakar bekas PWR secara proses kering untuk fabrikasi bahan bakar PHWR/CANDU^[3-4].

Proses fabrikasi bahan bakar DUPIC dimulai dari *dismantling* (pembongkaran) bundel bahan bakar bekas PWR hingga diperoleh *rod* yang kemudian dipotong-potong dengan ukuran tertentu tergantung dari peralatan yang tersedia. Rod yang sudah terpotong dipisahkan antara bahan bakar dan kelongsong (*decladding*) secara mekanik dan termik. Rod hasil *decladding* dikenai proses OREOX (*Oxidation and Reduction of Oxide Fuel*) yaitu oksidasi pada suhu sekitar 450 °C dan reduksi pada suhu 700 °C dalam suasana gas argon. Proses OREOX merupakan proses yang memiliki ketahanan proliferasi dan akuntabilitas^[5]. Dalam proses OREOX tidak terjadi proses pemisahan bahan nuklir yang bisa digunakan sebagai senjata nuklir sehingga dapat dilakukan di negara yang telah menandatangani NPT (*non-proliferation treaty*) seperti Indonesia. Siklus oksidasi dan reduksi digunakan untuk memecah kelongsong bahan bakar, hal ini tercapai dengan meningkatkan *stress* pada kelongsong dan dikarenakan peningkatan volume yang besar dari UO_2 ke U_3O_8 pada bahan bakar yang dioksidasi^[6]. Gas fisi seperti Xe dan Kr dihilangkan dari serbuk bahan bakar konversi pelet bahan bakar bekas selama proses OREOX dan nuklida volatil seperti Cs dihilangkan dari pelet mentah selama proses sintering. Namun, produk fisi yang lain tetap ada di serbuk bahan bakar dan pelet mentah,

dan produk fisi ini mempengaruhi serbuk bahan bakar DUPIC dan properti pelet^[7].

Dalam bahan bakar, produk fisi dapat ditemukan sebagai atom terlarut, pada gelembung gas atau dapat mengendap pada larutan dengan fase sekunder stabil. Uji pasca iradiasi menunjukkan bahwa dua kelompok produk fisi dominan yang terbentuk yaitu *metallic “white inclusions”* dan *“gray phases”*. *Metallic “white inclusions”* digantikan oleh molybdenum, technetium, ruthenium, rhodium dan palladium, dan *“gray phases”* (Ba, Sr, Cs) (Zr, U, Pu, Mo, RE) O_3 dimana, bagian utama terdiri dari BaZrO_3 dan elemen tanah jarang (RE). Komposisi fase ini bergantung dan berdasarkan komposisi bahan fisil, rasio O/M bahan bakar, gradien temperatur didalam pin, *burn-up* dan sejarah iradiasi^[8]. Berbagai peralatan yang diperlukan dalam instalasi bahan bakar DUPIC berada di dalam *hot cell*, tungku OREOX, sistem *off-gas treatment*, penghancur dan pencampur bahan bakar bekas PWR untuk pembuatan bahan bakar DUPIC, mesin kompaksi, tungku sinter temperatur tinggi, *grinder*, pembersih dan pengering pelet, pengatur *stack* pelet dan pengumpan pelet untuk membuat pelet bahan bakar DUPIC, mesin las laser untuk fabrikasi elemen bahan bakar DUPIC, peralatan kontrol kualitas untuk karakterisasi serbuk bahan bakar DUPIC, pelet dan elemen bakar^[9].

Penggunaan *hot cell* ini dikarenakan bahan bakar bekas PWR yang merupakan bahan awal bahan bakar DUPIC memiliki tingkat radioaktivitas yang sangat tinggi sehingga memerlukan *hot cell* untuk menjamin keselamatan pekerja dan lingkungan.

Korea telah mengembangkan fasilitas bahan bakar DUPIC sejak tahun 1999 guna memproses bahan bakar bekas PWR dan memfabrikasinya dalam skala laboratorium. Dalam fasilitas tersebut, sebanyak 25 buah peralatan fabrikasi telah diinstal. Sementara itu di Indonesia, juga telah dilakukan penelitian dan pengembangan bahan bakar DUPIC dimulai dari kajian proses fabrikasi, proses siklus oksidasi-reduksi dan karakterisasi serbuk hasil proses^[10-12]. Namun penelitian bahan bakar DUPIC di Indonesia untuk pembuatan pelet sinter dan karakterisasi setelah proses siklus oksidasi-reduksi belum dilakukan. Pada proses DUPIC tidak ada proses pemisahan produk fisi dan transuranium, sementara unsur volatil dan semi volatil dihilangkan selama perlakuan termal/mekanik. Material radioaktif tinggi diolah melalui proses fabrikasi yang dilakukan dalam *hot cell*^[13]. Untuk mengatasi hal tersebut, dalam penelitian ini digunakan bahan kimia (Sr, Y, Zr, Mo, Ru, Rh, Pd, Te₂, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Cd, Eu, Gd dan Sb – oksida) sebagai pengganti produk fisi sesuai hasil perhitungan software Origen pada *burn up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU. Tujuan dari

penelitian ini adalah untuk mempelajari karakteristik pelet sinter bahan bakar nuklir simulasi DUPIC dari serbuk hasil proses siklus oksidasi-reduksi.

2. Metodologi

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelet sinter tipe PWR dengan diameter 11,16 mm dibuat dari serbuk UO₂ yang ditambah bahan kimia berbentuk oksida sebagai simulasi hasil fisi yaitu Sr, Y, Zr, Mo, Ru, Rh, Pd, Te₂, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Cd, Eu, Gd dan Sb – oksida. Pelet-pelet sinter tersebut telah diperoleh dari penelitian sebelumnya^[14,15]. Bahan lain adalah Zn stearat yang digunakan sebagai pelumas pada saat pengompakan serbuk menjadi pelet mentah. Program komputer Origen digunakan untuk memperkirakan komposisi simulasi bahan bakar bekas dengan UO₂ pengayaan U²³⁵ 4%, lama penyimpanan 5 tahun dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU^[14]. Selanjutnya pelet sinter dilakukan proses oksidasi menggunakan tungku *Thermolyne* pada suhu 500 °C selama 1 jam dengan kecepatan pemanasan 5°C per menit. Pada proses oksidasi ini, pelet sinter hancur menjadi bentuk serbuk. Serbuk yang diperoleh dari proses oksidasi selanjutnya dilakukan proses reduksi dengan menggunakan *Muffle Furnace* pada suhu 800 °C selama 3 jam dalam suasana gas hydrogen.

Setelah proses reduksi, sampel dipasivasi dengan menggunakan gas nitrogen. Proses oksidasi-reduksi ini disebut dengan siklus oksidasi-reduksi ke-1. Setelah itu dilakukan karakterisasi antara lain uji *tap density* menggunakan alat *tap density meter*, *bulk density* dengan alat *bulk density meter*, *surface area* dengan alat *surface area meter* dan rasio O/U. Serbuk hasil oksidasi-reduksi siklus ke-1 tersebut kemudian dipres menjadi pelet mentah tipe PHWR dengan diameter 15 mm menggunakan mesin *final pressing*. Kemudian pelet mentah disinter menjadi pelet sinter dengan menggunakan tungku sintering pada suhu 1700 °C selama 3 jam. Pelet sinter yang diperoleh dikarakterisasi seperti densitas, pengamatan mikrosruktur dengan alat mikroskop optik dan uji kekerasan menggunakan *micro hardness tester*.

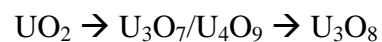
3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Proses Oksidasi-reduksi siklus ke-1

Pelet UO_2 sinter yang mengandung bahan simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU setelah dioksidasi pada suhu 500 °C selama 1 jam berubah bentuk menjadi serbuk. Hal ini terjadi karena pada proses oksidasi, pelet sinter berbasis UO_2 saat dioksidasi berubah menjadi U_3O_8 . Pembentukan U_3O_8 pada proses

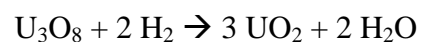
oksidasi bahan bakar pelet UO_2 menyebabkan *cracking* atau pecahnya pelet UO_2 , karena terjadi kenaikan volume sebesar 32 – 36%, ketika UO_2 bertransformasi menjadi U_3O_8 ^[16]. Parameter suhu dan waktu oksidasi merupakan faktor penentu hasil serbuk. Produk fisi membentuk solid solution di dalam matriks UO_2 dan menghambat pembentukan U_3O_8 ^[17].

Oksidasi UO_2 melibatkan dua tahap reaksi yaitu:



Pembentukan $\text{U}_3\text{O}_7/\text{U}_4\text{O}_9$ dari UO_2 melibatkan penurunan volume yang kecil. Efek penambahan UO_2 dengan produk fisi terlarut dalam matriks, terutama lanthanida, terhadap kecepatan oksidasi telah dipelajari dan telah dituliskan bahwa pada *solid UO_2 - M_2O_3 -solutions* (M = Y, La, Gd) ada kenaikan kinetik penghambat pembentukan U_3O_8 dengan semakin bertambahnya jumlah dopan^[18].

Setelah proses oksidasi yang mengubah bentuk pelet menjadi serbuk U_3O_8 , maka untuk dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar DUPIC harus diubah kembali menjadi UO_2 dengan jalan direduksi dengan gas hidrogen pada suhu 800 °C selama 3 jam dengan reaksi:



Serbuk UO_2 hasil proses oksidasi-reduksi siklus ke-1 dikarakterisasi antara lain *bulk density*, *tap density*, *surface area* dan rasio O/U. Pada Tabel 1 ditunjukkan data

karakterisasi serbuk hasil oksidasi-reduksi pelet simulasi bahan bakar DUPIC dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU.

Tabel 1. Data Hasil Pengukuran *Bulk Density*, *Tap Density*, *Surface Area* dan Rasio O/U Serbuk UO_2 Simulasi Bahan Bakar DUPIC Proses Oksidasi-Reduksi Siklus ke-1

No.	Bahan	<i>Bulk Density</i> , g/cm^3	<i>Tap Density</i> , g/cm^3	<i>Surface Area</i> , m^2/g	Rasio O/U
1	Serbuk UO_2 simulasi bahan bakar DUPIC dengan <i>burn-up</i> 40 MWd/kgU ^[15]	1,8310	2,9686	0,5202	2,0213
2	Serbuk UO_2 simulasi bahan bakar DUPIC dengan <i>burn-up</i> 60 MWd/kgU	1,8200	2,5220	1,1487	2,0325

Menurut petunjuk pelaksanaan kendali mutu fabrikasi batas penerimaan *bulk density* dan *tap density* UO_2 serbuk untuk pembuatan pelet adalah $1,5 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ dan 2 g/cm^3 ^[19]. Dari Tabel 1 diperlihatkan bahwa serbuk UO_2 hasil proses oksidasi reduksi siklus ke 1 memiliki *tap density* dan *bulk density* yang lebih besar dari serbuk UO_2 *fresh*. Jika dibandingkan dengan densitas (baik *bulk density* maupun *tap density*) serbuk UO_2 yang dicampur dengan hasil fisi sebelum dibuat pelet (pustaka nomor 14), maka serbuk hasil proses oksidasi pelet UO_2 menjadi serbuk U_3O_8 kemudian direduksi kembali menjadi serbuk UO_2 , telah terjadi kenaikan baik untuk *burn-up* 40 MWd/kgU^[15] maupun 60 MWd/kgU. Hal ini disebabkan pada proses sinter telah terjadi pemadatan dari yang semula serbuk kemudian menjadi pelet dimana pelet tersebut lalu dioksidasi dan

reduksi menjadi bentuk serbuk lagi. Sebaliknya untuk *surface area*, telah terjadi penurunan yang mungkin disebabkan butir-butir yang diperoleh pada proses oksidasi-reduksi siklus ke-1 cukup besar. Pada Tabel 1 terlihat bahwa densitas (*bulk density* dan *tap density*) untuk *burn-up* 60 MWd/kgU lebih rendah daripada yang 40 MWd/kgU. Rasio O/U dari kedua jenis *burn-up* tersebut (40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU) cukup baik yaitu masing-masing 2,0213^[15] dan 2,0325.

3.2. Pembuatan pelet mentah dan sinter simulasi bahan bakar DUPIC

Setelah proses oksidasi-reduksi selesai (disebut siklus oksidasi-reduksi ke-1) dimana serbuk U_3O_8 direduksi menjadi serbuk UO_2 , maka langkah selanjutnya adalah proses pengepresan serbuk menjadi pelet mentah tipe PHWR.

Pelet mentah ini kemudian diukur dimensi dan ditimbang beratnya sehingga dapat diukur densitasnya. Selanjutnya dilakukan proses sintering untuk mengubah pelet mentah menjadi pelet sinter. Hasil pengukuran densitas pelet mentah dan densitas pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU hasil siklus oksidasi-reduksi ke-1 diperlihatkan pada Tabel 2. Densitas rerata pelet sinter yang diperoleh untuk *burn-up* 40 MWd/kgU adalah $7,8144 \text{ g/cm}^3$ (71,30 %TD), dimana TD adalah Theoretical Density. Sedangkan densitas rerata pelet sinter yang diperoleh untuk *burn-up* 60 MWd/kgU adalah $8,9529 \text{ g/cm}^3$ (81,69 %TD). Densitas pelet sinter yang diharapkan mencapai 94 - 95 %TD. Dari penelitian ini densitas pelet sinter belum tercapai sehingga proses oksidasi-reduksi perlu dilanjutkan sampai beberapa siklus lagi.

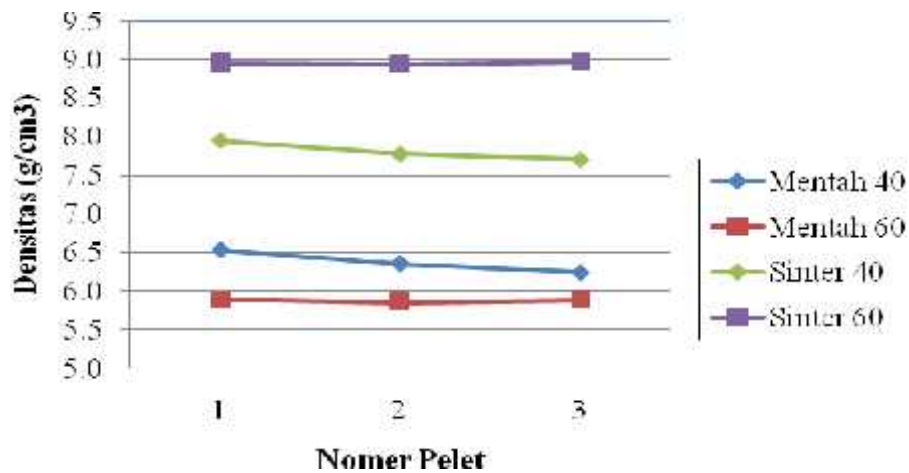
Tabel 2 memperlihatkan *burn-up* 60 MWd/kgU mengalami peningkatan densitas dari pelet mentah ke pelet sinter lebih besar daripada *burn-up* 40 MWd/kgU.

Bahan bakar simulasi DUPIC dengan *burn-up* 40 MWd/kgU mengalami kenaikan rerata

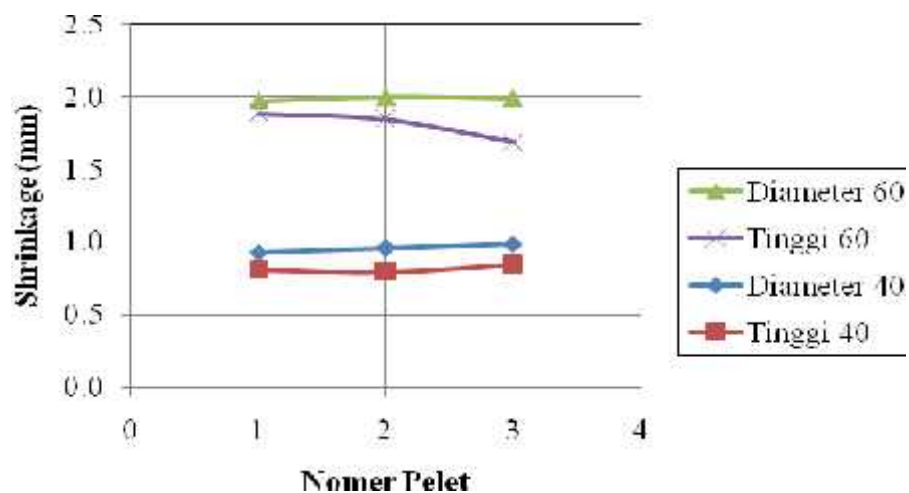
$1,4363 \text{ g/cm}^3$ atau sekitar 22,5318% sedangkan *burn-up* 60 MWd/kgU mengalami kenaikan rerata $3,0767 \text{ g/cm}^3$ atau sekitar 52,3592%. Hal ini menunjukkan bahan bakar simulasi DUPIC dengan *burn-up* 60 MWd/kgU memiliki kemampuan sinter yang lebih besar dari *burn-up* 40 MWd/kgU. Sehingga dengan densitas pelet mentah yang lebih rendah mampu mendapatkan densitas pelet sinter yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa bahan kimia yang digunakan untuk simulasi bahan fisi yang sengaja ditambahkan untuk membuat simulasi bahan bakar DUPIC dapat berfungsi sebagai bahan aditif sintering, sehingga mampu menambah kecepatan densifikasi pelet pada proses sintering. Seperti pada pustaka nomer 19 bahwa pada proses pertumbuhan butir, dengan adanya dopan akan menyebabkan pergerakan batas butir menjadi terhambat sehingga memudahkan terjadinya proses densifikasi. Seberapa besar peranan dopan ini perlu dikaji lebih lanjut karena untuk simulasi bahan bakar DUPIC bahan kimia yang ditambahkan pada penelitian ini ada 18 macam.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Densitas Pelet Mentah dan Pelet Sinter Simulasi Bahan Bakar DUPIC Proses Oksidasi-Reduksi Siklus ke-1

Nomor pelet	<i>Burn-up</i> 40 MWd/kgU		<i>Burn-up</i> 60 MWd/kgU	
	Densitas Pelet mentah, g/cm^3	Densitas Pelet sinter, g/cm^3	Densitas Pelet mentah, g/cm^3	Densitas Pelet sinter, g/cm^3
1	6,5351	7,9519	5,8923	8,9509
2	6,3540	7,7813	5,8563	8,9394
3	6,3781	7,7099	5,8801	8,9688
Rerata	6,3781	7,8144	5,8762	8,9529



Gambar 1. Hubungan Antara Densitas Pelet Mentah *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU



Gambar 2. Hubungan Antara *Shrinkage* Dengan Bahan Bakar Simulasi DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke-1 dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kg.

Dari Gambar 2 diperlihatkan bahwa *burn-up* 60 MWd/kgU mempunyai *shrinkage* yang lebih besar dari *burn-up* 40 MWd/kgU. Densitas pelet mentah yang lebih rendah mampu memberikan densitas pelet sinter yang lebih besar. *Shrinkage* atau penyusutan ini

Hal ini terjadi karena alat kompaksi yang digunakan untuk pengompakan serbuk menjadi pelet mentah adalah *single acting*

menyebabkan densitas pelet sinter bahan bakar simulasi DUPIC proses oksidasi reduksi siklus ke-1 *burn-up* 60 MWd/kgU lebih besar dari *burn-up* 40 MWd/kgU. *Shrinkage* yang terjadi pada diameter pelet lebih besar daripada *shrinkage* tinggi pelet.

double floating pressing machine. Karakter alat pengompakan menyebabkan pada arah aksial (tinggi pelet) terkena tekanan

pengompakan sedangkan pada arah lateral (diameter pelet) tidak mengalami penekanan. Hal ini menyebabkan pada saat sintering, *shrinkage* terjadi lebih besar pada area yang tidak mengalami penekanan yaitu arah lateral (diameter pelet).

3.3. Pengujian kekerasan pelet sinter simulasi hasil fisi

Hasil uji kekerasan untuk pelet sinter simulasi hasil fisi yang diperoleh dari proses siklus oksidasi-reduksi ke-1 dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU diperlihatkan pada Tabel 3. Kekerasan rerata dari pelet sinter tersebut masing-masing adalah 589,8 HVN dan 451,6 HVN. Dibandingkan dengan peneliti lain yang menggunakan UO_2

dan dopan Er_2O_3 0,2-1% diperoleh kekerasan pelet sinter berkisar antara 544 - 668 HVN dan tanpa dopan sebesar 549 HVN^[20]. Kekerasan pelet sinter dengan *burn up* 60 MWd/kgU lebih kecil dibandingkan dengan yang 40 MWd/kgU. Hal ini mungkin disebabkan oleh banyaknya hasil fisi simulasi yang ada pada pelet dengan *burn up* tinggi tersebut. Dari Tabel 3, pelet sinter *burn-up* 40 MWd/kgU terdapat rentang kekerasan HVN yang cukup lebar, hal ini menunjukkan kekerasan tidak terdistribusi merata. Hal ini terjadi karena permukaan sampel yang dijejak alat uji kekerasan kemungkinan ada *crack* dibawahnya.

Tabel 3. Data Hasil Uji Kekerasan Pelet Sinter Simulasi Bahan Bakar DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke 1 dengan *Burn-up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU

No	Kekerasan HVN	
	40 MWd/kgU	60 MWd/kgU
1	383	441
2	772	464
3	464	351
4	724	514
5	606	488
Rerata	589,8	451,6

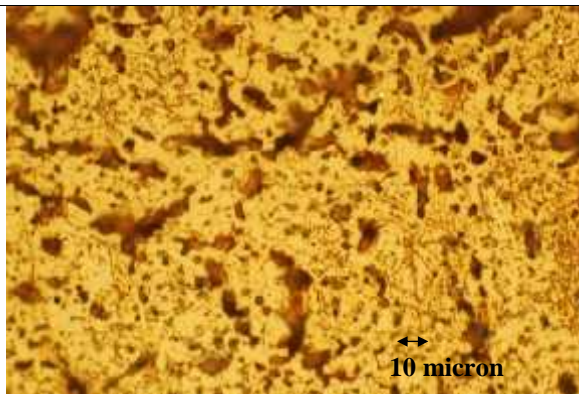
3.4. Pengamatan mikrostruktur

Hasil pengamatan mikrostruktur dengan perbesaran 500x untuk pelet sinter simulasi bahan bakar DUPIC proses oksidasi reduksi siklus ke-1 dengan *burn-up* 40 MWd/kgU diperlihatkan pada Gambar 3 hingga 6 dan untuk *burn-up* 60 MWd/kgU diperlihatkan

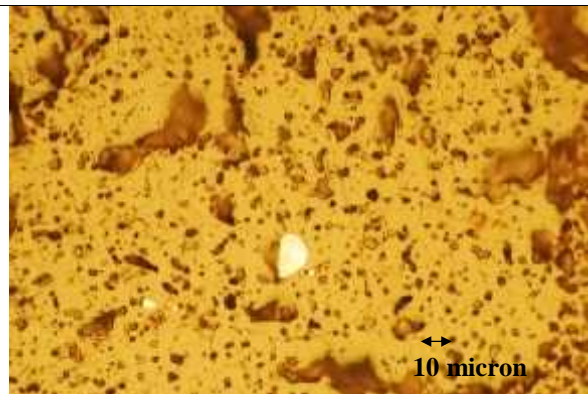
pada Gambar 7 hingga 10. Terlihat perbedaan bahwa *burn-up* 40 MWd/kgU mulai terjadi pertumbuhan butir memiliki butir yang lebih kecil dibandingkan dengan 40 MWd/kgU. Perbedaan ini disebabkan komposisi hasil fisi yang tidak sama pada kedua *burn-up* tersebut. Adanya

banyak unsur logam sebagai hasil fisi simulasi mengendap dan terdistribusi ke dalam batas butir terutama pada *burn-up* tinggi. Hal ini akan menghambat pertumbuhan butir^[7]. Sehingga pada *burn-up* 60 MWd/kgU pertumbuhan butir tidak sebesar *burn-up* yang lebih rendah (40 MWd/kgU). Hasil mikrostruktur *burn-up* 40 MWd/kgU memperlihatkan banyak terdapat pori yang melintang memanjang. Hal ini kemungkinan

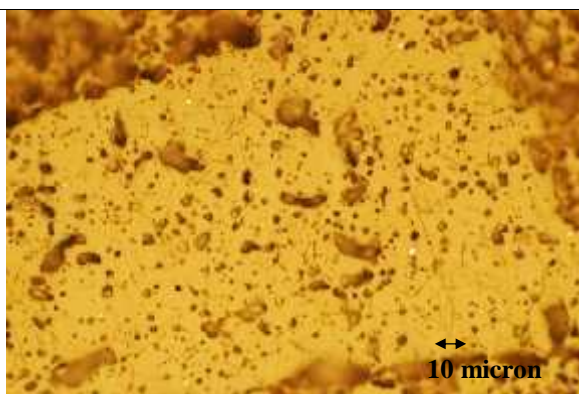
menyebabkan *crack* didalam. Keberadaan *crack* didalam bisa diperkuat justifikasinya dari hasil pengujian densitas pelet sinter *burn-up* 40 MWd/kgU yang lebih rendah dari pelet sinter *burn-up* 60 MWd/kgU. Sedangkan *burn-up* 60 MWd/kgU memiliki pori dengan persebaran yang merata. Hal ini dipengaruhi oleh banyak parameter seperti sifat serbuk, ukuran butir dan parameter pengompakan.



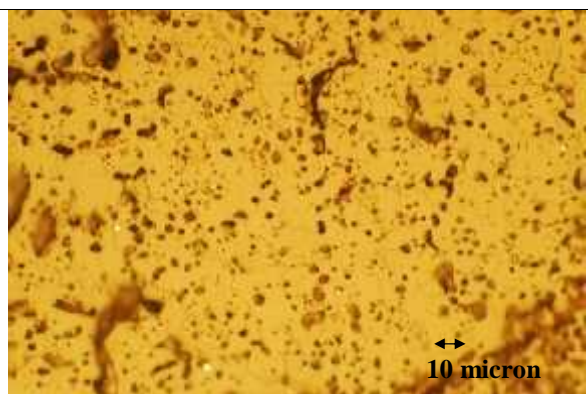
Gambar 3. Mikrostruktur pelet sinter simulasi bahan bakar DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke 1 dengan *burn-up* 40 MWd/kgU penampang melintang tepi



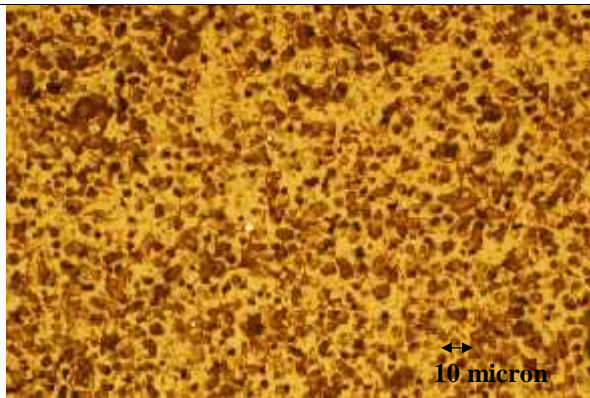
Gambar 4. Mikrostruktur pelet sinter simulasi bahan bakar DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke 1 dengan *burn-up* 40 MWd/kgU penampang melintang tengah



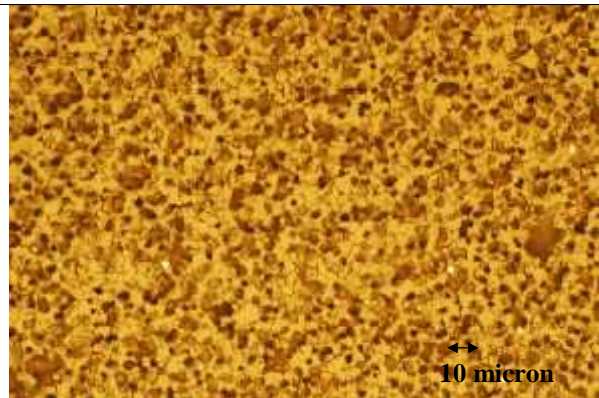
Gambar 5. Mikrostruktur pelet sinter simulasi bahan bakar DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke 1 dengan *burn-up* 40 MWd/kgU penampang membujur tepi



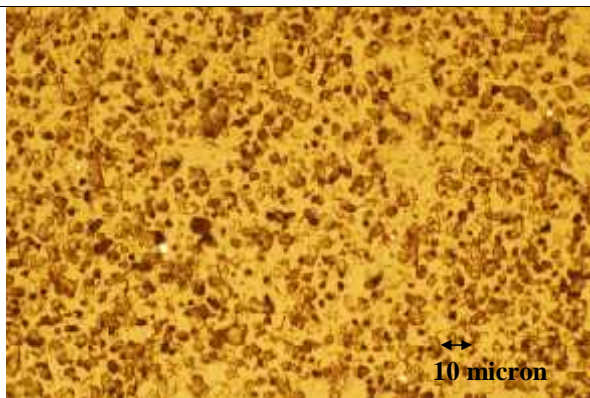
Gambar 6. Mikrostruktur pelet sinter simulasi bahan bakar DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke 1 dengan *burn-up* 40 MWd/kgU penampang membujur tengah



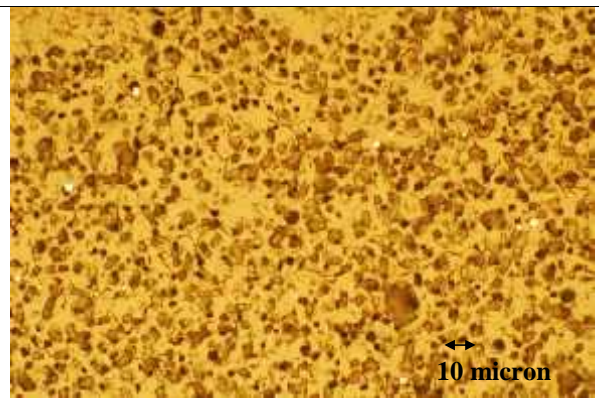
Gambar 7. Mikrostruktur pelet sinter simulasi bahan bakar DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke 1 dengan *burn-up* 60 MWd/kgU penampang melintang tepi



Gambar 8. Mikrostruktur pelet sinter simulasi bahan bakar DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke 1 dengan *burn-up* 60 MWd/kgU penampang melintang tengah



Gambar 9. Mikrostruktur pelet sinter simulasi bahan bakar DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke 1 dengan *burn-up* 60 MWd/kgU penampang membujur tepi



Gambar 10. Mikrostruktur pelet sinter simulasi bahan bakar DUPIC Proses Oksidasi Reduksi Siklus ke 1 dengan *burn-up* 60 MWd/kgU penampang membujur tengah

4. Kesimpulan

Karakterisasi serbuk UO_2 hasil proses oksidasi-reduksi siklus ke-1 dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU menunjukkan bahwa untuk *bulk density* dan rasio O/U yang diperoleh relatif sama, sedangkan untuk *tap density* dan *surface area* terdapat perbedaan. Densitas pelet sinter dari serbuk UO_2 hasil proses oksidasi-reduksi

siklus ke-1 untuk *burn-up* 60 MWd/kgU (81,69 %TD) lebih baik dari *burn-up* 40 MWd/kgU (71,30 %TD). Kekerasan pelet sinter *burn-up* 40 MWd/kgU sebesar 589,8 HVN dan *burn-up* 60 MWd/kgU sebesar 451,6 HVN. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa *burn-up* 60 MWd/kgU lebih baik dari *burn-up* 40 MWd/kgU. Adanya hasil fisi pada serbuk mempengaruhi

karakteristik pelet sinter, proses oksidasi-reduksi perlu dilakukan pengulangan hingga beberapa kali.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Yth. Tim Penelitian Pengembangan Teknologi Proses DUPIC antara lain Saudara : Agus Sartono D.S. A.Md, Mugiyono A.Md, Mahpudin, Triarjo S.ST, Suyoto S.ST, Iwan Setiawan ST, Yatno DAS, M.M. Lilis Windaryati, Mu'nisatun Sholichah S.ST, Banawa Sri Galuh A.Md, Mujinem A.Md, Ngatijo A.Md, Isfandi A.Md, Slamet Pribadi A.Md, Sri Wahyuningsih S.ST, serta staf BKKABN dan BPFBBN yang telah membantu kegiatan penelitian ini.

6. Daftar Pustaka

1. Jong Sook Hong, Ho Dong.Kim, Myung Seung Yang, Hyun Soo Park, Howard Menlove, Ahmed Abou-Zahra and Winston Alston, Safeguards Experience on the DUPIC Fuel Cycle Process, LA-UR-01-0936 *Korea Atomic Energy Research Institut-Korea, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos-USA International Atomic Energy Agency, Vienna*, <http://lib-www.lanl.gov/la-pubs/00796025.pdf>, diakses 27-6-2014
2. Myung Seung Yang, Hangbok Choi, Chang Joon Jeong, Kee Chan Song, Jung Won Lee, Geun Il Park, Ho Dong Kim, Won Il Ko, Jang Jin Park, Ki Ho Kim, Ho Hee Lee and Joo Hwan Park, (2006), *The Status And Prospect of DUPIC Fuel Technology*, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 38 No. 4.
3. Jewhan Lee, Jeong Ik Lee, Won Joon Chang and Soon-Heung Chang, (2010), *Comparative cost analysis of direct disposal versus pyro-processing with DUPIC in Korea*. Annals of Nuclear Energy 37.
4. Chang Je Park, Kweon Ho Kang, Ho Jin Ryu, Cheol Yong Lee, In Ha Jung, Je Sun Moon, Joo Hwan Park, Sang Ho Na and Kee Chan Song, (2008), *Irradiation tests and post-irradiation examinations of DUPIC fuel*. Annals of Nuclear Energy 35.
5. B. Szpunar and J.A. Szpunar, (2012), *Application of density functional theory in assessing properties of thoria and recycled fuels*, Journal of Nuclear Materials, article in press.
6. Geun Il Park, Jae Won Lee, Jung Won Lee, Young Woo Lee and Kee Chan Song, (2008). *Effect of impurities on the microstructure of DUPIC fuel pellets using the simfuel technique*, Nuclear Engineering and Technology, Vol.40 No.3.

7. G. Brilliant, F. Gupta and A. Pasturel, (2011), Fission products stability in uranium dioxide, *Journal of Nuclear Materials*, 412.
8. <http://nextbigfuture.com/2009/04/dupic-fuel-cycle-direct-use-of.html>, DUPIC Fuel Cycle, Direct Use of Pressurized Water Reactor Spent Fuel in CANDU, diakses 25 Juni 2014.
9. Sigit, (2006), Proses Fabrikasi Bahan Bakar DUPIC, Prosiding Seminar Nasional XV Kimia Dalam Industri dan Lingkungan, hal. 69-74, Yogyakarta, 7 Desember 2006, ISSN 0854-4778.
10. Sigit, Martoyo, Ngatijo, Rahmat, P. dan R. Didiek, H., (2005), Pengaruh Siklus Proses Oksidasi-Reduksi Uranium Oksida Terhadap Densitas Dan Butiran Serbuk U_3O_8 Dan UO_2 , *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, Vol.1, No. 2, Juni 2005, hal 68 -76, P2TBDU BATAN, Serpong, ISSN 1907-2635.
11. Sigit, Ghaib Widodo, Haryono, S.W., Supardjono, M. dan Nurwidjajadi, (2008), Pengaruh Temperatur, Waktu Oksidasi dan Konsentrasi ZrO_2 Terhadap Densitas, Luas Permukaan dan Rasio O/U Hasil Reduksi ($U_3O_8+ZrO_2$), *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir URANIA*, Vol.14, No.3, Serpong, ISSN 0852-4777.
12. Myung Seung Yang, Joo Hwan Park, Won Il Ko, Kee Chan Song, Kun Mo Choi and Jin Kyoung Kim, (2007), Evaluation of proliferation resistance using the INPRO methodology, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 2.
13. Erilia Yusnitha, Tri Yulianto dan Etty Mutiara, (2013), Pengaruh *Burn Up* Terhadap Karakteristik Pelet Sinter Simulasi Bahan Bakar Bekas, *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir URANIA*, Vol. 19, No. 3, 149-160, Serpong, ISSN 0852 – 4777.
14. Erilia Yusnitha, Sigit, Bambang, H., Agus, S.D.S., Mugiyono, Ade Mahpudin, Triarjo, Suyoto, Iwan, S., Yatno, D.A.S., Sugeng, R., M.M. Lilis W., Benawa, S.G., Ngatijo. Rahmiati, Asminar, Mu'nisatun, S., Mujinem, Isfandi, Slamet, P., (2014), Pengembangan Teknologi Proses DUPIC, Hasil-hasil Penelitian EBN Tahun 2013, PTBBN-BATAN, Serpong, ISSN 0854-5561.
15. B. Szpunar, J.A. Szpunar, V. Milman and A. Goldberg, (2013), Implication of volume changes in uranium oxides: A density functional study. *Solid State Sciences* 24, 44 – 53. K.H. Kang, S.H. Na, K.C. Song, S.H. Lee and S.W. Kim, (2007), Oxidation behavior of the simulated fuel with dissolved fission products in air at 573-873 K, *Thermochimica Acta* 455.

16. Reijo Pehrman, Martin Trummer, Claudio M. Lousada and Mats Jonsson, (2012), On the Redox Reactivity of Doped UO_2 Pellets – Influence of Dopants on the H_2O_2 Decomposition Mechanism, Journal of Nuclear Materials, 430.
17. Futichah, Tri Yulianto, (2013), Pembesaran Ukuran Butir UO_2 dengan Penambahan Dopan Untuk Mengurangi Pelepasan Gas Fisi, Jurnal Teknologi Bahan Nuklir Vol. 9, No. 1, 1-11, ISSN 1907-2635
18. Abdul Latief, Tata Terbit S., Djoko Kisworo, Slamet Pribadi dan Arief, S.A., (2005), Pengaruh Tekanan Pengompakan, Komposisi Er_2O_3 Dan Penyinteran Pada Temperatur Rendah Terhadap Kualitas Pelet $\text{UO}_2+\text{Er}_2\text{O}_3$, Jurnal Teknologi Bahan Nuklir Vol. 1, No. 2, 58-107, ISSN 1907-2635.